

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по научной работе

доктор технических наук



Драгунов В.К.

« 24 » ноября 2021 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Коршунова Алексея Михайловича «Полимерные пены и вспененная эмульсия: нуклеация пузырей, фазовые переходы, горение», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

### Актуальность темы исследования

Диссертация Коршунова А.М. направлена на исследование процессов фазового перехода в полимерных пенах и вспененных эмульсиях. Исследование проблем, связанных с фазовыми переходами, актуально для разработки методов получения полимерных пен. В работе анализируется влияние сдвиговых деформаций на процесс нуклеации газовых пузырей в пересыщенных растворах полимер/газ. Исследование этого вопроса актуально для создания и развития современных экструзионных линий по вспениванию полимеров. В диссертации также исследуются вопросы, связанные с горением *вспененной эмульсии*. Актуальность данной темы исследования обусловлена уникальными свойствами таких горючих систем. Например, если в состав вспененной эмульсии входит порядка 95 мас. % воды, то такие пены могут сохранять свою горючесть, что особенно актуально для развития технологии утилизации смесей углеводород/вода путем их сжигания.

### Анализ содержания работы

Диссертация состоит из Введения, девяти глав, объединенных в два раздела, и Заключения, которые представляют собой единый связанный материал, посвященный проблеме фазового перехода в пенах.

Во **введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы; сформулированы цели работы, научная новизна и практическая ценность

полученных результатов; перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, объеме и структуре работы.

В **первом** разделе диссертации обсуждаются вопросы фазового перехода в полимерных пенах. Здесь представлены результаты теоретического и экспериментального исследований, обсуждаются вопросы нуклеации и коалесценции газовых пузырей в пересыщенном растворе полимер/газ при экструзионном методе вспенивания полимеров. Во **втором** разделе диссертации рассматриваются вопросы горения пен на водной основе. При исследовании таких систем анализируется влияние фазового перехода, нуклеации пузырей на скорость распространения фронта пламени в пене.

В **главе 1.1** на основе теоретического анализа исследуются проблемы нуклеации и коалесценции газовых пузырей в пересыщенных растворах полимер/газ. На основе классической теории нуклеации рассматриваются вопросы зарождения пузырей в пересыщенных растворах полимер/газ при воздействии сдвиговых напряжений. Получена оценка для итоговой численной плотности пузырей в полимерных пенах с учетом процессов их нуклеации и коалесценции.

В **главе 1.2** диссертации приводятся результаты экспериментального исследования процесса нуклеобразования и коалесценции пузырей в пересыщенном растворе полиэтилен/изобутан. Здесь анализируется влияние коэффициента вязкости полимера, температуры, концентрации нуклеобразователя и конструктивных характеристик нового типа формирующего инструмента на численную плотность пузырей в пене.

Во **втором** разделе диссертации рассматриваются вопросы горения вспененной эмульсии. Вспененная эмульсия – это новый тип топлива, который впервые исследуется в рамках данной работы.

В **главе 2.1** рассматриваются проблемы, связанные с “ускоренным” режимом распространения пламени во вспененной эмульсии. Показано, что основную роль при ускорении пламени во вспененной эмульсии играет процесс взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии. Сущность этого явления состоит в следующем: при распространении пламени тепловой поток из зоны горения передается в холодные слои вспененной эмульсии. В результате интенсивного нагрева жидкой фазы возможно ее взрывное вскипание. При взрывном вскипании формируется поток пара и капель, который увлекает реагирующую смесь в холодные слои пены. Кроме того, в этой главе



диссертации обсуждается режим горения вспененной эмульсии, который получил название “*воспламенение - погасание*”.

В **главе 2.2** рассматриваются вопросы горения вспененной эмульсии при повышенном содержании воды. Исследование этих вопросов имеет важное прикладное значение из-за необходимости сжигания углеводородных смесей с повышенным содержанием воды, например, при решении экологических проблем, связанных с разливом углеводородов на поверхности воды. В данной главе показано, что горючесть вспененной эмульсии при «*медленном*» режиме горения определяется в основном структурой вспененной эмульсии, а при «*ускоренном*» режиме распространения пламени структура вспененной эмульсии не играет существенной роли.

В **главе 2.3** рассматривается метод утилизации разлитых углеводородов на поверхности воды путем сжигания вспененной эмульсии, здесь также представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на регулирование скорости распространения пламени во вспененной эмульсии. Основное внимание в диссертации уделяется таким методам регулирования скорости распространения пламени, как: изменение диаметра трубки, использование спирали Щелкина внутри трубки, изменение концентраций частиц оксида магния и стабилизатора. На основе полученных экспериментальных результатов сделаны выводы, что при увеличении диаметра трубки возрастает общая скорость горения вспененной эмульсии из-за снижения тепловых потерь в стенку трубки. При наличии препятствий в канале скорость пламени в “*ускоренном*” режиме горения вспененной эмульсии снижается, в силу роста гидравлических и тепловых потерь. Кроме того, установка препятствий внутри трубки способствует сужению пределов распространения пламени. В этой главе показано, что частицы оксида магния способствуют ускорению пламени. Обусловлено это тем, что минеральные микрочастицы являются гетерогенными центрами нуклеации при взрывном вскипании жидкой фазы вспененной эмульсии. Одним из важных выводов этой главы является то, что частицы оксида магния в горючей вспененной эмульсии позволяют изменять общую скорость горения вспененной эмульсии более чем в пять раз, но при этом пределы распространения пламени во вспененной эмульсии существенно не изменяются.

В **главе 2.4** анализируется влияние метода изготовления эмульсии вода/углеводород на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии. Представленные в этой главе результаты показывают, что от метода изготовления эмульсии скорость распространения пламени во вспененной эмульсии зависит весьма существенно. Обусловлено это тем, что капли углеводорода выполняют роль гетерогенных центров



нуклеации в процессе взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии. При использовании ультразвуковой обработки эмульсии размер капель углеводорода оказывается меньше критического значения. Это приводит к тому, что условия для взрывного вскипания вырождаются, что в итоге способствует снижению скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.

В главе 2.5 рассматриваются вопросы горения вспененной эмульсии совместно с частицами торефицированной биомассы. Здесь показано, что частицы биомассы могут оказывать существенное влияние на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии. При этом влияние микрочастиц биомассы на скорость распространения пламени оказывается неоднозначным. Так, в зависимости от концентрации частиц биомассы общая скорость горения вспененной эмульсии имеет максимум. Обусловлено это тем, что с одной стороны, с ростом концентрации биомассы в бедной вспененной эмульсии возрастает температура во фронте пламени, что способствует ускорению пламени во вспененной эмульсии. С другой стороны, частицы биомассы являются гетерогенными центрами нуклеации паровых пузырей при взрывном вскипании, поэтому рост концентрации частиц способствует более тонкому диспергированию капель воды и, как следствие, приводит к росту тепловых потерь во фронте пламени. Конкуренция между этими процессами приводит к неоднозначной зависимости скорости пламени от концентрации частиц биомассы.

В главе 2.6 рассматриваются вопросы детонации в водород-кислородной микропене на водной основе. В этой главе показано, что существование детонационной волны в микропене связано с эффектом кумулятивного схлопывания газовых пузырей. При схлопывании пузыря микроскопического размера давление внутри пузыря может возрастать на порядок величины по сравнению с давлением в падающей ударной волне. Благодаря кумулятивному эффекту становится возможным воспламенение горючей смеси внутри пузыря, даже при воздействии на него слабой ударной волны. При расширении газа в пузыре формируется вторичная ударная волна, под действием которой схлопывается соседний пузырь. В результате развития такого эстафетного процесса формируется самоподдерживающаяся детонационная волна.

В главе 2.7 анализируется процесс горения вспененной эмульсии, полученной на основе вспенивания эмульсии гептан/вода с помощью смеси водород-кислород. Здесь продемонстрирована возможность существования различных режимов горения вспененной эмульсии. Показано, что использование водорода способствует увеличению скорости распространения пламени во вспененной эмульсии. При определенных условиях



возможно даже возникновение детонационного режима горения. Для бедной водород-кислородной смеси, в зависимости от концентрации гептана в эмульсии, общая скорость горения вспененной эмульсии имеет максимум. Для стехиометрической смеси водород-кислород с ростом концентрации гептана скорость пламени при горении вспененной эмульсии монотонно уменьшается. Для вяло детонирующего состава вспененной эмульсии возможно возникновение спинового режима горения.

### **Степень достоверности**

Представленные в диссертации результаты экспериментальных исследований с высокой точностью повторяются в многочисленных экспериментах и согласуются с результатами численных исследований других авторов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками.

### **Значимость полученных результатов**

В результате выполнения данной работы был разработан и создан уникальный экспериментальный стенд для исследования проблем нуклеобразования в пересыщенных растворах полимер/газ при воздействии сдвиговых напряжений. В результате исследования установлено, что путем изменения скорости сдвиговых деформаций можно в широком диапазоне величин изменять численную плотность газовых пузырей в полимерной пене. На основе проведенных экспериментальных исследований автором диссертации было установлено, что в неоднородном поле скорости потока вблизи стенки экструзионного формирующего инструмента активно протекают процессы коалесценции газовых пузырей (режим градиентной коалесценции пузырей). Впервые был предложен и исследован новый тип горючей системы – вспененная эмульсия. Разработаны методы получения горючих вспененных эмульсий на основе эмульсий углеводород/вода и проанализированы различные режимы горения вспененных эмульсий - “медленный”, “ускоренный” и режим “воспламенение - погасание”. Автором диссертации установлено, что “ускоренный” режим горения вспененной эмульсии определяется процессами взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии. Проанализированы условия воспламенения во вспененной эмульсии с повышенным содержанием воды, установлены пределы распространения пламени. Проанализированы методы регулирования скорости распространения пламени во вспененной эмульсии (влияние инертных микрочастиц, спирали Щелкина, ПАВ). Впервые был исследован механизм кумулятивной детонации в

микропенах на водной основе и проанализирован ускоренный режим горения во вспененной эмульсии, когда углеводородные капли диспергированы в жидкой матрице, а в состав пузырей входит водород-кислородная смесь.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Из текста работы не ясны причины, вследствие которых учитывается только гетерогенный механизм нуклеации газовых пузырей в пересыщенных растворах и не рассматривается гомогенная нуклеация, а также не учитывается дальнейший рост этих пузырей.

2. В работе упоминается фазовый переход в рассматриваемых объектах исследования – полимерных пенах и вспененных эмульсиях. Однако отсутствуют пояснения, что понимается под этим термином (фазовый переход имеет жесткие критерии для своего существования – не все процессы динамической релаксации неравновесной системы являются фазовым переходом).

3. Важное значение в стабильности и динамике пен, тем более полимерных, имеют поверхностно-активные вещества. Однако какова их роль в динамических процессах, связанных с горением, практически не рассматривается.

4. Рассмотренный в диссертации механизм Ландау, как одна из стадий ускорения фронта пламени в пенной эмульсии, носит качественный характер. Подтверждений этого механизма или достоверных оценок в работе не приводится.

5. К сожалению, в диссертации отсутствуют важные для понимания карты режимов горения пенных эмульсий, что не позволяет достаточно подробно разобраться в механизмах процессов, описанных в работе.

Указанные замечания не имеют принципиального характера и не снижают значимости диссертации.

### **Заключение**

Диссертация, представленная на 258 страницах с 411 литературными ссылками, является законченной и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные результаты достаточно полно опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых научных журналах. Материалы диссертации многократно докладывались на Всероссийских и Международных конференциях. В заключении



представлены основные выводы и рекомендации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа **«Полимерные пены и вспененная эмульсия: нуклеация пузырей, фазовые переходы, горение»** представляет собой завершённый научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему, полностью соответствует паспорту специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук. Автор диссертационной работы, **Коршунов Алексей Михайлович**, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа и отзыв были обсуждены и одобрены на заседании кафедры низких температур ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 18 ноября 2021 года, протокол №04–21/22.

Д.т.н., профессор,

профессор кафедры низких температур



А.С. Дмитриев

К.т.н.,

доцент кафедры низких температур



А.К. Ястребов

Дмитриев Александр Сергеевич

Ястребов Арсений Константинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Почтовый адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Телефон: (495) 362-75-60

Эл. почта: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)